

黒潮流路変動に伴う高温沿岸水波及時における 成層期東京湾内の流動構造と熱・物質輸送特性

日向博文¹・灘岡和夫²・八木 宏³・田淵広嗣⁴・吉岡 健⁵

¹正会員 博士(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所主任研究官 沿岸海洋研究部
(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 博士(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴正会員 修士(工) JR東日本 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

⁵正会員 修士(工) 電源開発株式会社(〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

1998年8月から1998年10月にかけて東京湾のほぼ全域で現地観測を行い、黒潮変動に伴う沖合暖水波及時における東京湾内の流動および海洋構造を明らかにすることを試みた。その結果、黒潮の変動に伴って沖合から湾口部へ波及した高温・高塩分・低濁度の沿岸水は、密度流として湾内中層に貫入するとともに、湾内地形と地球自転の効果によって複雑な経路を辿りながら湾内へ侵入し、反対に、高温・低塩分・高濁度の湾内表層水と低温・高濁度の湾内底層水がそれぞれ表層と底層から外洋へ流出することが明らかとなった。一方、暖水の波及しない平常時には上下2層のエスチャリー循環が卓越するが、この平常時に較べて暖水波及時には、上記の3層流動構造によって湾内の濁質が効果的に湾外へ排出されることが示された。

Key Words: Tokyo Bay, field observation, stratified condition, coastal warm water intrusion, density driven current

1. はじめに

様々な時空間スケールの現象が重畳している沿岸域の海況は、一般に非定常性が強く、また、空間的にも非常に複雑な様相を呈している。このため、沿岸域における流動や物質輸送、あるいはそれらの総体としての生態環境には未だ解明されていない点が多く残されている。このように沿岸域が複雑であり、また、非定常性が強い海域となっている大きな要因として、沿岸域の海況に外力として働く4つの境界の影響をあげることができる。これらは、海流等の変動を通じての外洋の影響、河口や海岸を通じての陸域の影響、海面を通じての風の応力や熱・水などの交換等による気象の影響、および懸濁粒子の堆積・巻き上げや底泥からの溶出等を通じての海底の影響である(杉本¹⁾)。これらの中でも、近年、沿岸域の海況や生態環境に与える外洋影響の重要性が、海洋、水産、土木などの分野で再認識されるようになり、その実態の解明が様々な調査・研究を通じて試みられている。

本研究で対象としている東京湾が位置する太平洋側

南岸の沖合には、黒潮という巨大な海流が様々な時空間スケールでその流路を変動させながら東方へと流去している。数年スケールの変動としては、紀伊水道～遠州灘沖での大蛇行モードと非蛇行型モード間における流路変動現象が良く知られている。さらにその数年スケールの黒潮流路変動に、季節変動や数日から数10日程度の時間スケール(以下、総観スケール)の変動が重なり合うことによって、黒潮は離接岸や小蛇行を繰り返している。そして、この総観スケールの海況変動が黒潮沿岸域における海水交換や生態環境に大きな影響を与えていることが、近年明らかにされつつある(例えば、文献2))。

例えば、この総観スケールの黒潮変動に関連して、相模湾、豊後水道など広く外洋に面した沿岸域や、宇和島湾、宿毛湾などの小湾では急潮と呼ばれる現象が発生する。急潮は、沿岸域における急激な水温上昇と流速の増加を引き起こし、沿岸漁業に多大な被害を与えることが知られているが、その一方で、これらの海域における海水交換に対して非常に重要な役割を果たしていることが明らかにされつつあ

る（例えば、松山ら³⁾、武岡ら⁴⁾、Takeoka and Yoshimura⁵⁾、秋山・柳⁶⁾、秋山⁷⁾）。また、日本南岸では冬季に陸棚縁や湾口部などの外洋との接合域において沿岸フロントの一種である熱塩フロントが発生し、冬季における沿岸域-外洋間の物質輸送に大きな影響を与えていることが知られている。そして、Yoshioka⁸⁾は、紀伊水道に発生する熱塩フロントの消長に対して、間欠的に発生する黒潮系暖水塊の接岸が本質的に重要な働きをしていることを明らかにしている。さらに、秋山⁹⁾は、これらの日本南岸域における総観スケールの海況変動現象を、黒潮暖水舌という物理構造をキーワードとして整理している。

以上から明らかなように、我が国南岸における外洋影響を明らかにする上で、総観スケールの黒潮変動に伴う沿岸域の海況変動の実態を解明することが大きな課題となっている。しかしながら、本州南岸に位置する我が国の代表的な閉鎖性水域である東京湾の海況に対する黒潮影響に着目した研究例は非常に少なく、これまでその実態はほとんど未解明のままであった。その要因として、間欠的に発生する物理現象をとらえる上で最も重要となる係留ブイによる長期連続観測が、海上交通量の多い東京湾では非常に困難なこと、また、地形的に閉鎖性が強いために黒潮変動の影響はそれほど重要ではないと考えられてきたことなどがあげられる。しかしながら、最近、日向ら¹⁰⁾は、東京湾湾口部に係留されている航路ブイを利用した水温・塩分の長期連続観測と調査船を用いた現地観測によって、冬季において間欠的に発生する黒潮系暖水の波及が、東京湾の湾口フロントの形成に対して本質的に重要な働きをしていること、さらに、冬季における内湾-外洋間の物質輸送や湾内の温熱環境に対しても多大な影響を及ぼしていることを明らかにしている。また、夏季の東京湾に関してYanagi et al.¹¹⁾は、湾口部における5日間程度の短期の現地観測から、黒潮フロントが沿岸域に接岸した場合、黒潮水や沖合いの暖水が、等密度の水塊が存在する湾内中層に貫入し（中層貫入）、高濁度の内湾水が表層と底層から外洋へ流出する可能性を指摘している（図-1）。さらに、彼らは沿岸域における水位変動データの解析から、成層期においてこの中層貫入現象がしばしば発生しているものと推定している。野村¹²⁾は、10年にわたる湾央部での定点調査に基づき、湾内における外洋性動物プランクトンの月別出現状況を調べている。その結果、例年、秋季に外洋性動物プランクトンの出現種数と出現量に顕著なピークが現れることを明らかにしている。そして、外洋性動物プランクトンが増えるケースとして、大きく分けて2つのパターンがある

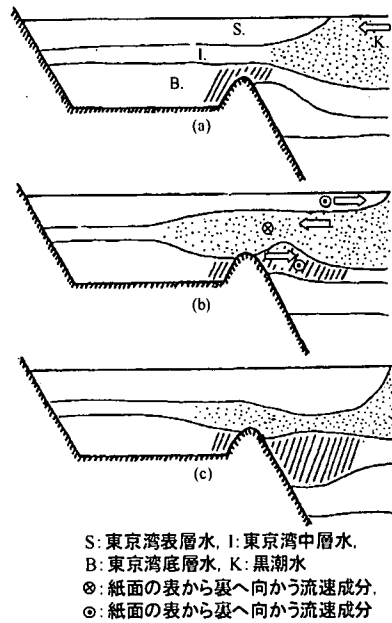
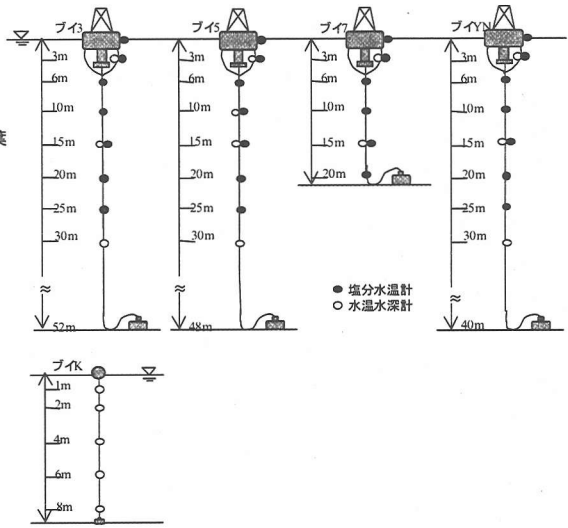
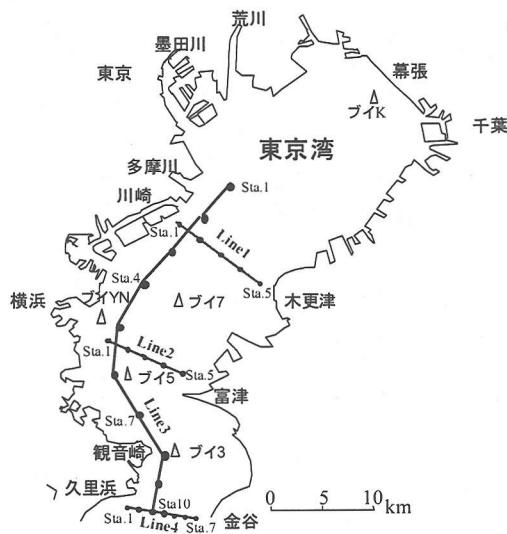


図-1 黒潮水の中層貫入に伴う東京湾表層水と底層水の間欠的な流出現象の模式図 (Yanagi et al.¹¹⁾に加筆)

ことを指摘している。一つは、北よりの風がエスチャリー循環を強化させる場合であり、もう一つは、黒潮系水が大島西水道から相模湾、浦賀水道に流入する場合、すなわち黒潮流軸の変動に伴って間欠的に黒潮系水が湾内へ流入する場合であるとしている。一方、高橋ら¹³⁾は、黒潮変動そのものではないが、浦賀水道中層に存在する塩分34psu以上の高塩分水の挙動に着目し、この水塊の総観スケールの上下運動が、成層期における湾内底層の流動や貧酸素水塊の移動に大きな影響を与えていることを指摘している。

これらの観測結果は、従来の認識とは異なり、黒潮など外洋における総観スケールの海況変動が、閉鎖性の強い東京湾の成層期・非成層期における流動や物質輸送に対して大きな影響を与えている可能性を示している。しかしながら、主に成層期を対象とした既存の研究例（文献11）、12）、13））では、外洋水の挙動、あるいは湾内における流動構造や物質輸送機構を、1点あるいは湾軸方向の水質観測結果のみから推定するとどまっており、外洋水塊の波及過程やそれに伴う湾内の3次元的な流動構造・海洋構造については未解明のままである。

そこで、本研究では、現地観測により、総観スケールの黒潮変動が成層期における東京湾の流動構造や物質輸送、あるいは湾内の温熱環境に与える影響を明ら



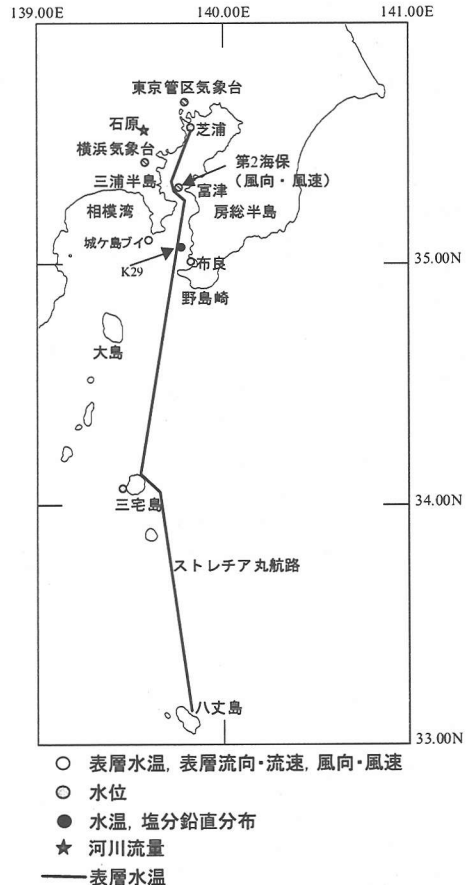
図一2 観測海域とブイ設置状況

かにすることを目的とした。本論文では、まず、1998年8月から10月の成層期に東京湾のほぼ全域で行った現地観測と公共機関による既存の観測データに基づいて、総観スケールの黒潮流路の変動に伴って発生した高温沿岸水の波及時における湾内の3次元流動構造や海洋構造を明らかにし、さらに、暖水波及が発生していない時期の観測結果と比較する。続いて、この間欠的な高温沿岸水の波及が、成層期における東京湾-外洋間の熱・物質輸送や海水交換に果たす役割について検討した結果を述べる。

2. 現地観測概要

観測海域を図一2に示す。東京湾に係留されている浦賀航路3番ブイ, 5番ブイ, 中の瀬航路7番ブイ, 横浜・根岸ブイ (以下, それぞれブイ3, ブイ5, ブイ7, ブイYN) の係留チェーン部, および幕張沖3kmに位置する千葉県海象気象観測塔 (以下, ブイK) に塩分・水温計を複数台設置し, ブイ3, 5, YNでは表層から中層までの, ブイ7, Kでは表層から底層までの水温・塩分の長期連続観測 (ブイ3, 5, 7, YN: 1998年8月4日~10月3日, ブイK: 1996年4月~) を行った。データはいずれも10分間隔でサンプリングしている。

また、98年8月11・12日 (以下, Run1: 大潮期), 18・19日 (以下, Run2: 小潮期), 98年9月8・9日 (以下, Run3: 大潮期), 15日 (以下, Run4: 小



図一3 本研究で用いた公共機関によるデータの観測点

潮期)の4回(計7日間)にわたり、湾内に設定した4つの観測線上の測点において調査船による断面観測を実施した。まず初日には、Line1(木更津ライン)とLine2(富津ライン)に調査船を1隻ずつ配備し、観測点における流速・水温・塩分・濁度・蛍光光度の往復観測を実施した。流速測定は、ADCP(RD社製:BBADCP, WHADCP(600kHz))を用いて行い、各観測点における計測時間は3~5分間とした。水質計測は多項目水質計(アレック電子社製:ACL200)を使用し、ADCP観測と同時に行った。片道の観測に要する時間は1時間程度であり、1潮汐間(約12時間)の観測で各点11~12回分のデータを取得することができた。2日目には調査船1隻を用いて、Line3(湾軸ライン)、Line4(久里浜ライン)上の観測点において初日と同様な12時間の断面観測を実施した。Line3では3~4回分の、Line4では1回分のデータを取得することができた。観測点は、Line1, Line2上に5点(神奈川県側からSta.1, Sta.2, ..., Sta.5とする)、Line3上に10点(湾奥側からSta.1, Sta.2, ..., Sta.10とする)、また、Line4上には7点(神奈川県側からSta.1, Sta.2, ..., Sta.7とする)を設定した。なお、Run1ではLine4における断面観測は行っていない。

また、図-3に、本研究の解析に使用した各公共機関(東京都、神奈川県各水産試験場、気象庁、運輸省、建設省)のデータの計測位置を示す。

図-4に観測期間中の気温・降水量(横浜気象台)、風速ベクトル(第2海保)、および多摩川河川流量(石原)を示す。月平均気温は8月が約27°Cであるのに対し、9月は約24°Cとなっており、8月に比べ3°C程度低下している。また、第2海保における風速ベクトルを見ると、8月は数日周期で南風、北風が規則的に吹き変わっており、平均では南風が卓越していることが分かる。一方、9月は、台風5, 7号が関東地方に上陸した時期を除けば北よりの風が卓越している。河川流量を見ると、台風や秋雨前線の影響によって、8月下旬~9月上旬と9月中旬以降に湾内へ大量の河川水が流入していることが分かる。

3. 長期連続ブイ観測結果

(1) 長周期水温変動特性

図-5は、各ブイにおける水温の25時間移動平均値の時系列変化を月齢とともに示したものである。ただし、ブイKでは、測器の故障により8月下旬以降、表層1mと底層8mにおける水温は欠測となっている。図を見ると、8月においては湾内全域で水温成層が発

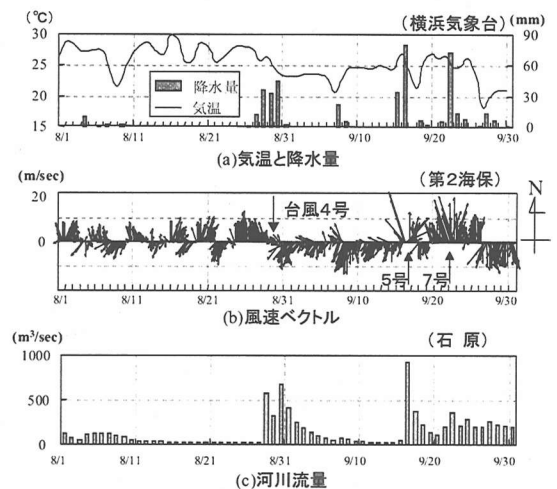


図-4 気象状況と河川流量

達しており、その成層構造を維持した形で数日スケールの変動が現れていることが分かる。この数日スケールの変動は、基本的に海上風の変動に対応したものとなっている。一方、9月には、月齢とは無関係に図中矢印で示した時期に、湾口部から湾中央にかけての中・底層の水温が急激に上昇しており、その上昇に伴って湾口部や湾中央部の水温が鉛直的にかなり一様化していることが分かる。湾口部に位置するブイ3においてその変化が顕著で、特に第1回目の水温上昇時には、8月31日から9月1日にかけてのわずか1日半の間に、中層の水温が5°C近く上昇している。湾奥部(ブイK)では、北よりの風が強くなる8月末に水温が急激に低下すると同時に水温成層が崩壊し、その後は、台風7号の通過に伴って南風が卓越した9月20日前後を除けば、水温はほぼ一定に保たれていることが分かる。以下では、主に、9月に発生した4回の急激な水温上昇に着目して議論を進めることにする。

(2) 黒潮変動に伴う高温沿岸水の沿岸域への波及

9月において湾口部から湾中央部にかけての広い範囲で発生した中・底層の急激な水温上昇の原因を調べるために、まず、各ブイの水温変動に対する鉛直一次的な熱収支解析を行った。具体的には、観測地点における単位断面積の水柱を考え、海表面を通して水柱に供給される熱輸送量を第2海保や気象台で計測された気象因子、あるいは係留ブイによって計測された表層水温を用いて算定し、また、水柱の貯熱変化量については係留ブイによる水温変動から求めた。ただし、直接計測が出来なかったブイ3, 5, YNの30m以深における水温は、断面観測の結果から判断して水深30mの水温と等しいものとし、また、8月下旬以降のブイ

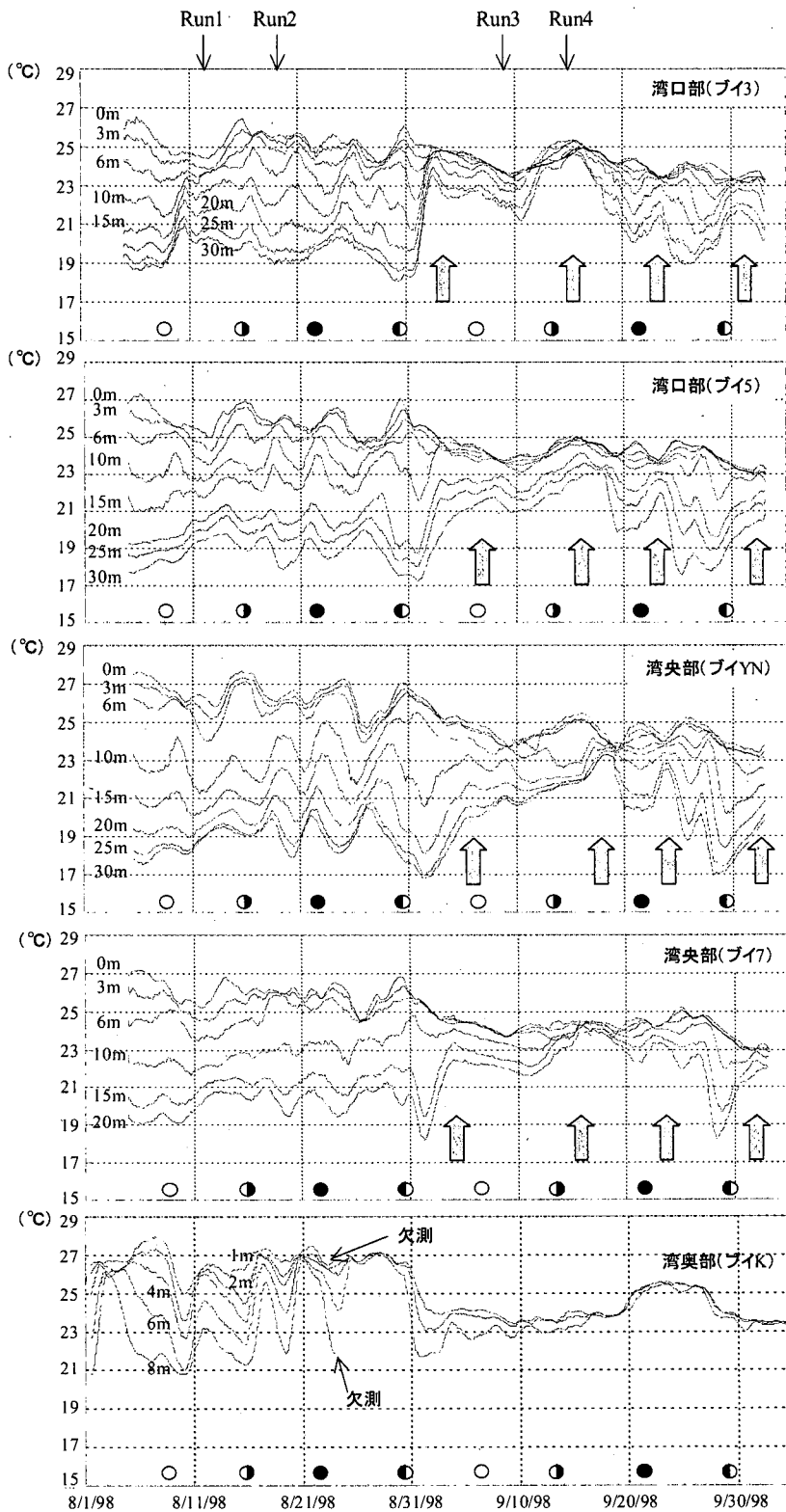


図-5 湾内における水温変動 (25時間移動平均値)

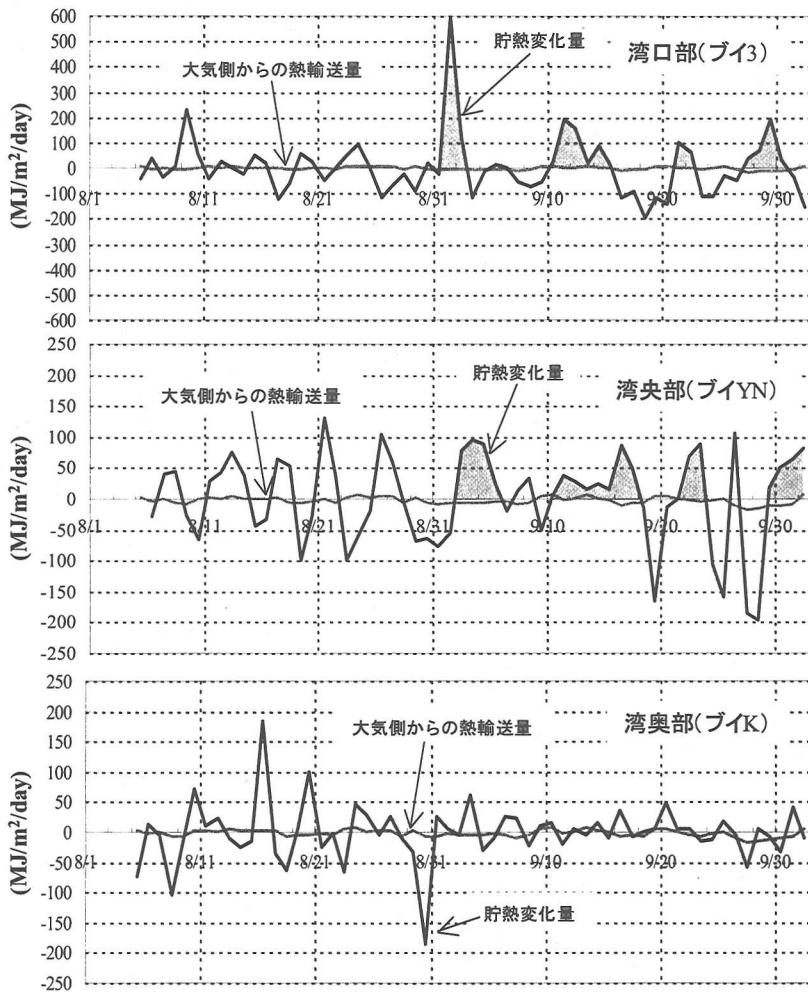


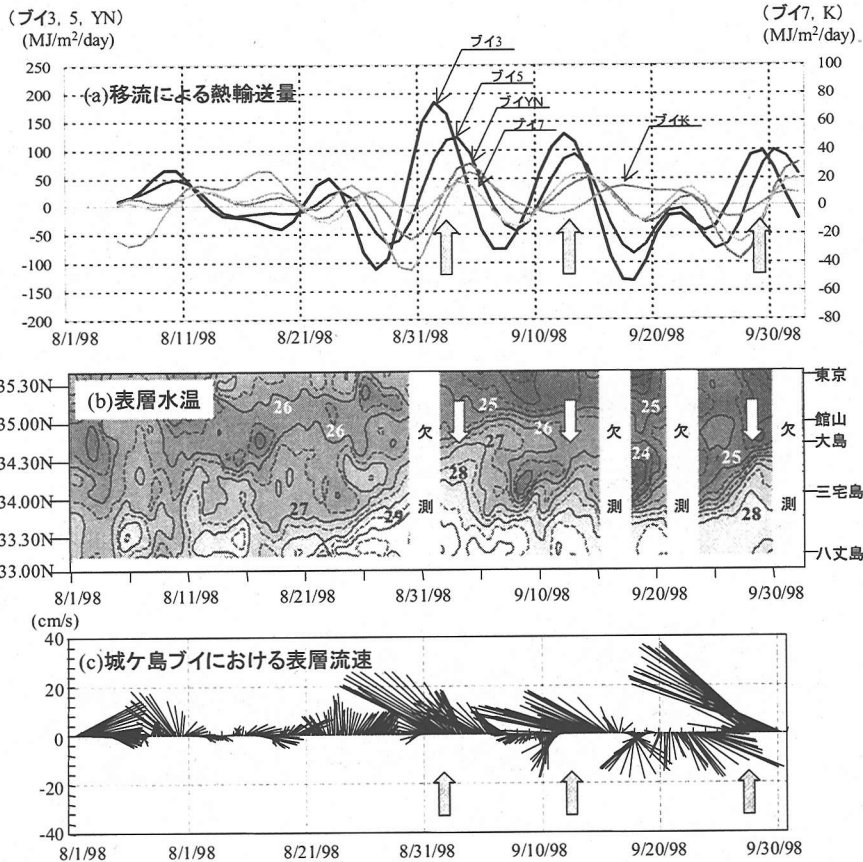
図-6 湾口部 (プイ3), 湾央部 (プイ5), 湾奥部 (プイ7) における貯熱変化量と大気からの熱フラックスの時系列

Kにおける表層および底層水温は、中層の水温を用いた外挿によって与えた。なお、熱収支解析方法の詳細については八木ら¹⁴⁾を参照されたい。

図-6にプイ3 (湾口部), プイ5 (湾央部), プイ7 (湾奥部)における水柱の貯熱変化量と大気から水柱へ輸送された正味の熱量の日変化を示す。すなわち、この両者の差は、海水流動に伴って側方より各水柱へ移流された熱量を表している。図を見ると、湾口部から湾央部にかけては、いずれの水温上昇時も中・底層水温の上昇によって観測地点における水柱の貯熱量が増大しており (図中ハッチ部), さらに、この貯熱量の増大に対して大気からの熱輸送はほとんど寄与していないことが分かる。ここには示さないが、プイ5, プイ7においても、プイ3やプイ5と同様な解析結果が得られており、さらに、1

回目の水温上昇の数日後に行ったRun3 (日向ら¹⁵⁾)や2回目の水温上昇時に行ったRun4の断面観測結果から、この中・底層の水温上昇が湾内の大部分に及んでいることが確認されている。すなわち、少なくとも1回目と2回目の水温上昇時においては、東京湾湾外から湾内へ大量の熱が輸送されることによって、湾内の総貯熱量が大きく増加しているものと考えられる。大気との熱輸送以外で湾内へ熱を供給する物理過程としては、湾奥部での河川水流入と湾口部を通した外洋水流入が考えられる。しかしながら、これらの水温上昇が河川流量の変化と明確な相関がないこと (図-4参照), また、湾口部ほど水温上昇が顕著であることなどの特徴から判断して、河川が湾内への直接的な熱供給源であるとは考え難い。

そこで、次に、この移流による熱輸送量と外洋域



図一七 (a) 移流による熱輸送量 (長周期成分), (b) 東京一八丈島間における表層水温のイソプレス, (c) 城ヶ島ブイにおける表層流速 (25 時間移動平均値)

における海況変動との対応関係を調べる。ここでは、1 週間以上の間隔で発生した急激な水温上昇に着目しているため、主に、数値フィルターによって抽出した移流による熱輸送量の長周期 (7 日周期以上) 成分について調べることにする。

図一七 (a) に、各ブイにおける長周期移流成分の時間変化を示す。湾口部や湾中央部に着目すると、1, 2, 4 回目の水温上昇時に大量の正の熱量が輸送されており、いずれの時期においても、湾口に近いほどその熱量が大きく、また、位相が早いことが分かる。一方、3 回目の水温上昇時には、同様な位相関係は見られるものの、熱輸送量は非常に小さくなっている。

図一七 (b) に、フェリー (ストレッチ丸) によって計測された東京一八丈島間の表層水温 (水深 4 m) のイソプレスを示す (航路は図一三を参照)。図中矢印で示すように 1, 2, 4 回目の水温上昇時に沖合の暖水が沿岸域へ波及していることが分かる。ただし、後程示す断面観測結果から分かるように、この

暖水は黒潮水そのものではなく高温の沿岸水である。一方、3 回目の水温上昇時には、明確な沿岸域への暖水波及を確認することは出来ない。また、城ヶ島沖 (観測位置は図一三参照) では、この沿岸域への暖水波及に伴って三浦半島に沿って北上する強い流れが発生している (図一七 (c))。

以上より 1, 2, 4 回目の急激な水温上昇は、総観スケールの黒潮変動に伴って間欠的に沿岸域へ波及した高温の沿岸水が、湾内中・底層へ侵入することによって発生しているものと考えられる。一方、3 回目の水温上昇は、暖水波及が直接的な原因ではなく、むしろ台風通過に伴う強い南よりの風が大きな影響を与えているものと考えられるが、現時点ではそのメカニズムについては明らかになっていない。

続いて、暖水波及時における湾内の 3 次元的な流動構造や海洋構造を、Run4 の断面観測結果に基づいて詳細に調べることにする。

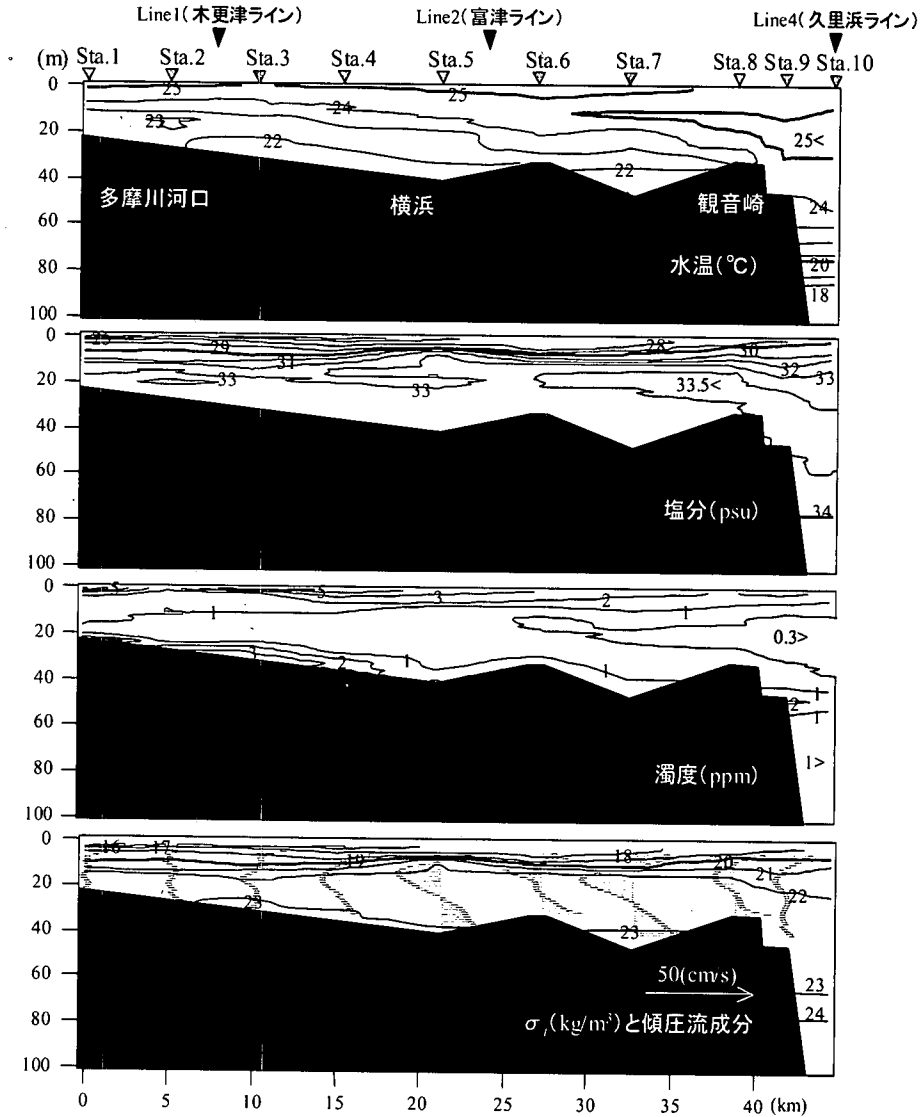


図-8 暖水波及時 (Run4, 9/15, 満潮時) における水温, 塩分, 濁度, 密度, 傾圧流 (湾軸平行成分) の湾軸断面内分布

4. 暖水波及時と平常時における湾内の3次元流動構造と海洋構造

8月から9月にかけて実施したRun1, Run2, Run3, Run4の計4回の断面観測のうち, ここでは, 主として第2回目の高温沿岸水の波及時に行われたRun4における観測結果に基づいて, 湾内への暖水の侵入状況を詳細に調べるとともに, 観測時における海上風や潮汐の条件がRun4とほぼ同じでありながら, 暖水侵入が見られなかったRun2の観測結果と比較する. なお, Run1 (8月11, 12日) とRun3 (9月9, 10日) における残差流構造や海洋構造の詳細については日向¹⁵⁾を参照されたい. また, Run2やRun4では日

潮不等が認められたため, 木更津ライン (Line1) や富津ライン (Line2) における残差流を, 観測された流速の単純な時間平均操作によって求めることは出来ない. そこでRun2とRun4では杉山ら¹⁶⁾の方法に従い, 湾内における水位変化と流速の傾圧流成分の相関を用いて残差流を求めている.

(1) 暖水波及時 (Run4) における湾内の流動構造と海洋構造

図-8にRun4 (9月15日) における湾軸断面内の水温, 塩分, 濁度, 密度と傾圧流分布を示す. なお, 観測時の海上風は2 m/s程度の弱い北よりの風であった. 図を見ると, 沖合より波及した高温・高塩

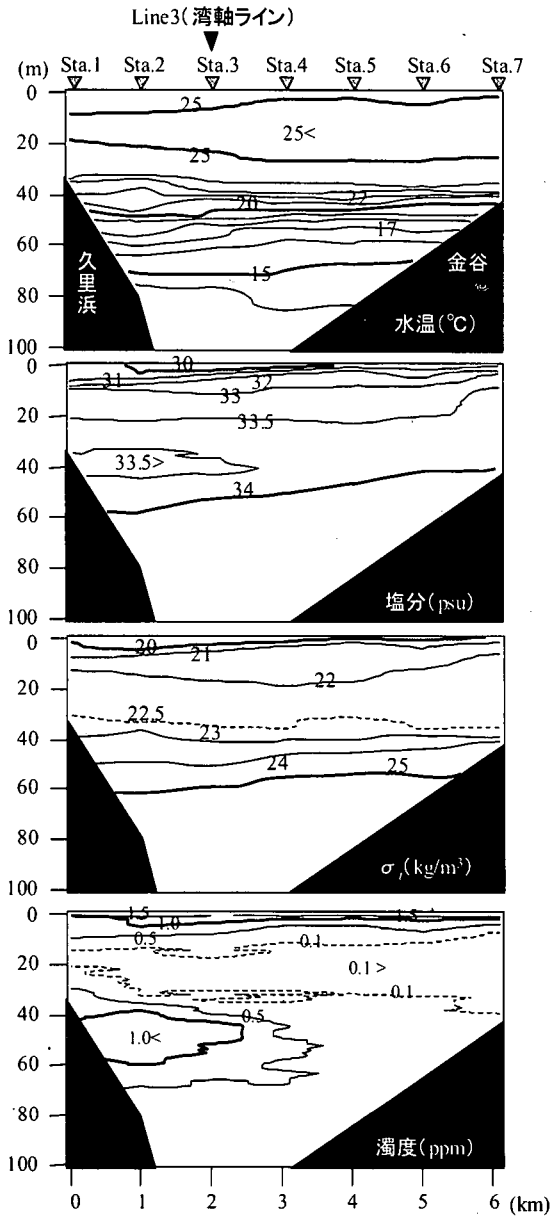


図-9 暖水波及時 (Run4, 9/15, 満潮時) における水温、塩分、密度、濁度の横断面内分布 (Line4: 久里浜ライン)

分・低濁度の暖水が、湾口部から湾中央部の中層に貫入している様子が明確にとらえられている (ハッチ部)。この暖水の中層貫入は、主に $\sigma_t = 22$ (kg/m^3) の等密度線に沿って湾中央部まで発達しており、その最大流速は $20 \sim 30 \text{ cm/s}$ 程度にまで達している。このことから、暖水の中層貫入が、密度流としての性格が強い流れであることが分かる。反対に、表層と底層からは、それぞれ高温・低塩分・高濁度の湾内表層水と低温・高濁度の湾内底層水が流出しており、

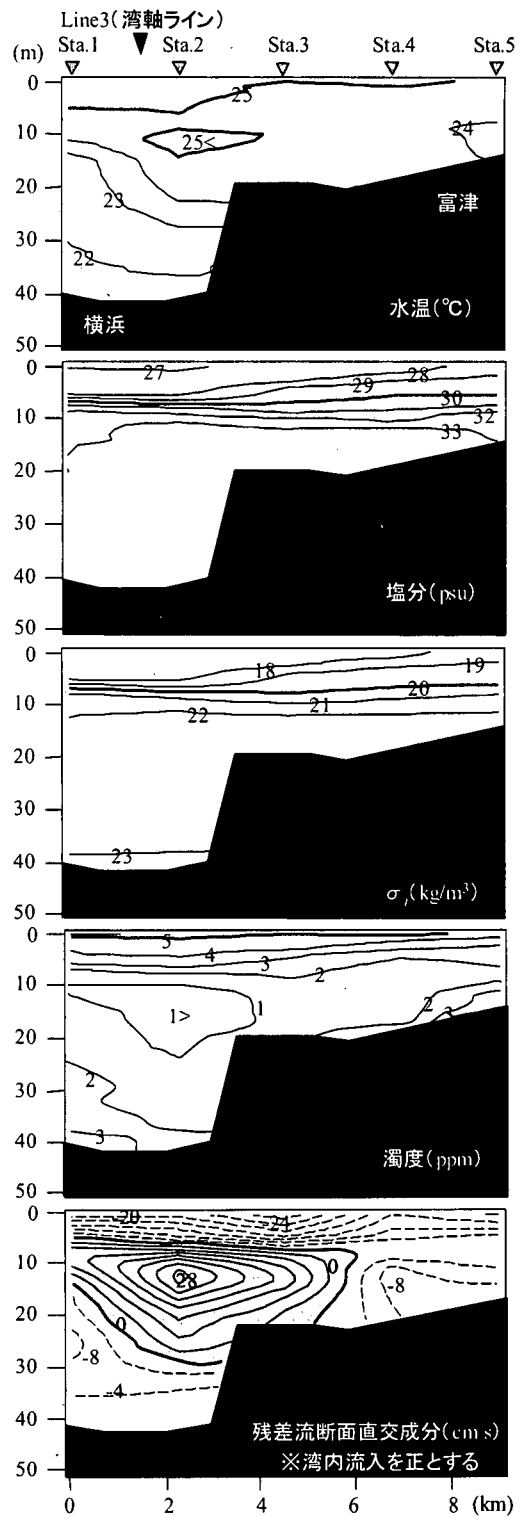


図-10 暖水波及時 (Run4, 9/15, 満潮時) における水温、塩分、密度、濁度、残差流 (断面直交成分) の横断面内分布 (Line2: 富津ライン)

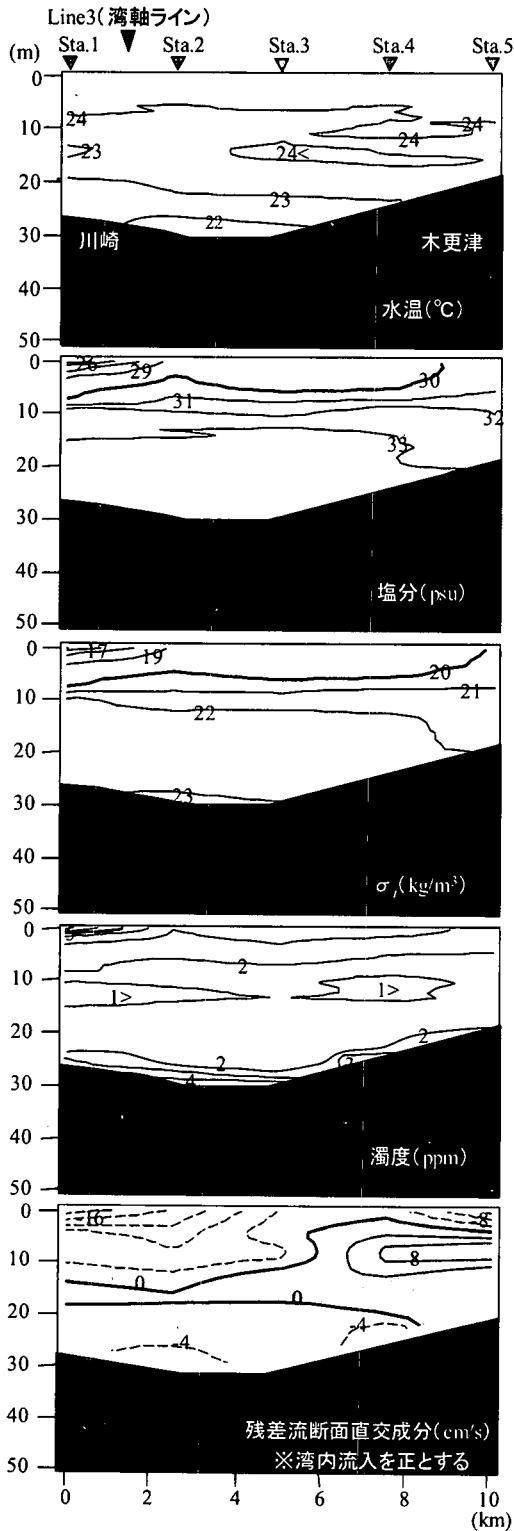


図-11 暖水波及時 (Run4, 9/15, 満潮時) における水温、塩分、密度、濁度、残差流 (断面直交成分) の横断面内分布 (Line1: 木更津ライン)

湾口部から湾中部にかけての湾軸部分では、傾圧流は明確な3層構造を形成していることが分かる。今回の観測によって確認されたこの上下3層の流動構造は、Yanagi et al.¹¹⁾ が水質観測から推定した中層貫入発生時における流動構造 (図-1) を支持する結果となっている。

続いて、図-9, 10, 11に湾軸横断面内の水温、塩分、濁度、密度と残差流の断面直交成分分布を示す。ハッチ部は湾内流入部を示している。ただし、湾口部久里浜ラインの中央部では水深が100mを超えており、断面観測に用いた ADCP (600kHz) では測流が出来なかったため、ここでは流速分布は示していない。まず、この最も外洋側に位置する久里浜ラインにおける観測結果 (図-9) を見ると、外洋から湾口部に侵入した高温・高塩分・低濁度の暖水は、地球自転の影響を受けて千葉県側でその厚みを増していることが分かる。一方、高温・低塩分・高濁度の内湾表層水と低温・高濁度の内湾底層水は、主に神奈川県側表層と底層から外洋へ流出している。このように、Yanagi et al.¹¹⁾ が指摘した中層貫入発生時における湾口部底層からの高濁度水の流出は (図-1 参照)、東京湾溪谷の神奈川県側斜面に沿った形で発生していることが明らかとなった。また、このような湾口部での高濁度水の流出パターンは、冬季における黒潮系暖水波及時にも確認されていることは非常に興味深い (日向ら¹⁰⁾)。富津ラインにおける観測結果 (図-10) を見ると、残差流は3次元性の強い構造となっていることが分かる。暖水は、神奈川県側中層をコア状に湾内へ流入しており、その最大流速は30cm/s程度までに達している。この暖水の侵入速度は、日向ら¹⁰⁾ によって計測された冬季における黒潮系暖水の侵入速度のほぼ2倍の大きさとなっている。また、湾内水は、神奈川県側の表層と底層および千葉県側全層から外洋へ流出している。湾軸部分に存在する溝がなくなり海底地形が比較的平坦になる湾中部木更津ライン (図-11) では、暖水は地球自転の効果によって再び千葉県側を湾奥に向かって流入している。しかしながら、富津ラインに比べるとその流入速度はかなり小さくなっており、また、暖水としての水塊特性も徐々に失われていることが分かる。

(2) 湾内への暖水侵入が発生していない時期 (Run2) における東京湾の海洋構造

Run2 (8月18, 19日) の観測時における海上風は3 m/s程度 of 弱い北よりの風であった。以下では、このRun2の観測時の状態を「平常時」と呼ぶことにする。図-12にRun2における干潮時の湾軸断面内で

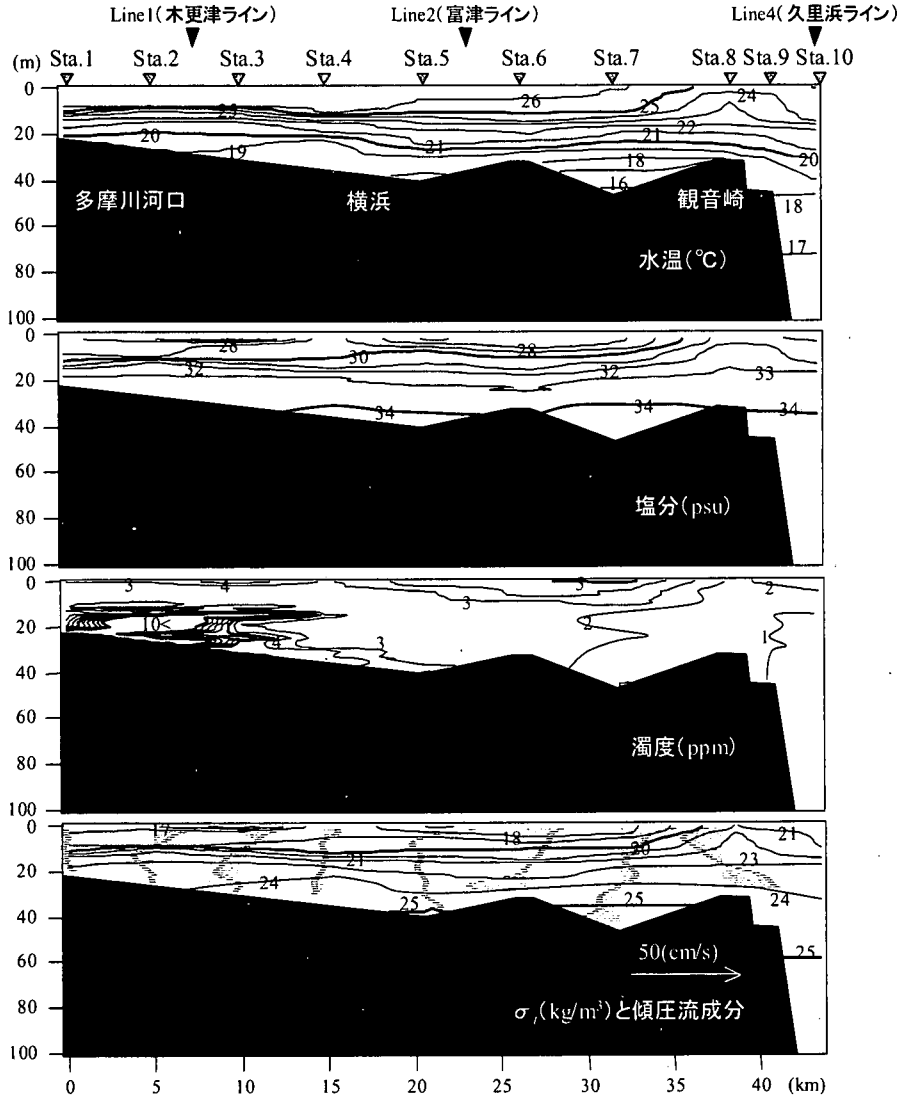


図-12 平常時 (Run2, 8/19, 干潮時) における水温, 塩分, 濁度, 密度, 傾圧流 (湾軸平行成分) の湾軸断面内分布

の水温, 塩分, 密度, 濁度と傾圧流の分布を示す。暖水の中層貫入が発生する以前においては, 水温, 塩分とも顕著な連続成層が発達しており, 表層と底層の水温差は最大で 10°C 程度, 塩分差は 8 psu 程度までに達している。なお, 水温, 塩分や密度の等値線が観音崎沖で盛り上がっているのは, この海域で発生している内部潮汐波によるものと考えられる(日向ら¹⁷⁾)。傾圧流の分布を見ると, 内部潮汐波の影響が大きい観音崎沖を除いて, 高温・低塩分・高濁度の内湾水が表層で流出し, 低温・高塩分・高濁度の水塊が底層で流入する形の鉛直循環流が見られる。

図-13, 14, 15に湾軸横断面における観測結果を示す。なお, Run2の断面観測時に木更津ラインで使用した水質計には, 濁度センサーが装備されてい

なかったため, 図-15では濁度分布は示していない。富津ライン(図-14)や木更津ライン(図-15)における観測結果からも, 高温・低塩分・高濁度の湾内表層水が表層から流出し, 低温・高塩分・高濁度の水塊が底層から湾内に流入する形の鉛直循環流が発達していることが分かる。これは観測時における北よりの風とエスチャリー循環の相乗効果によるものと考えられる。湾口部久里浜ラインにおける観測結果(図-13)を見ると, 神奈川県側表層から高温・低塩分の湾内水が流出していることが分かる。また, Run4と比較すると全体的に濁度が高くなっていることが分かる。このように, Run2では, 3層構造となる暖水波及時とは異なって, 基本的に湾奥からの淡水供給に起因した上下2層の流動構造(エスチャ

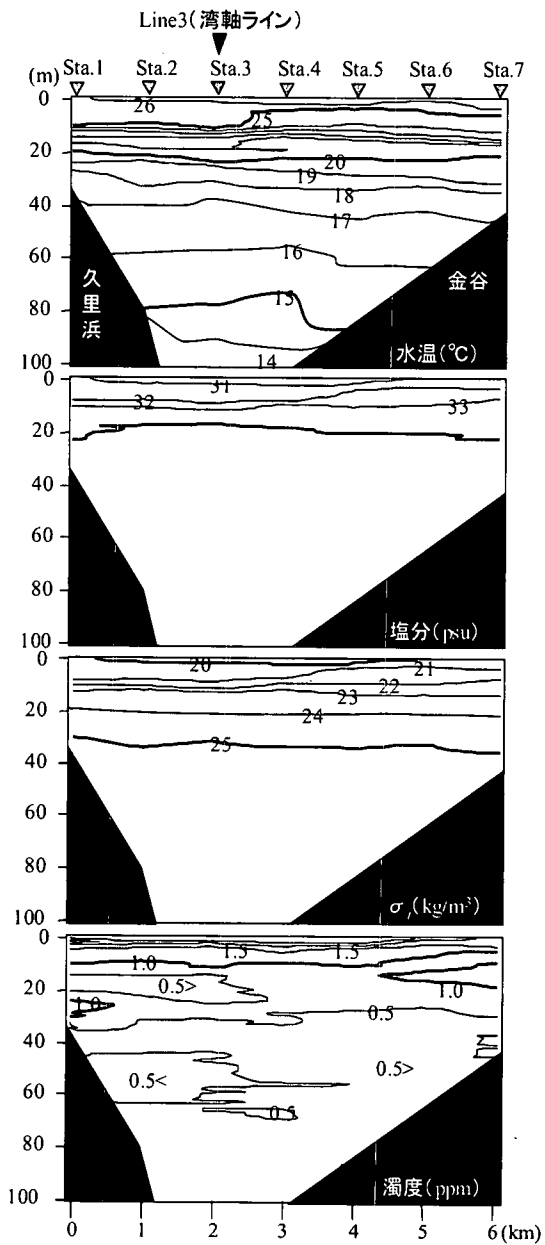


図-13 平常時 (Run2, 8/19, 満潮時) における
水温, 塩分, 密度, 濁度の横断面内分布
(Line4: 久里浜ライン)

リー循環) が卓越し, しかも下層では, 暖水波及時の底層とは逆に高濁度水が湾内に流入する形になる。ところで, 宇野木ら¹⁸⁾ が係留ブイによる連続観測データに基づいて明らかにした夏季1ヶ月間 (1979年7~8月) の平均流分布には, このような上下2層の流動パターンは明確な形では表れていない。また, Run2により得られた残差流の大きさは, 彼らの観測結果に比べ特に表層部分で大きな値となっている。一般に, 夏季 (7~8月) における東京湾の海

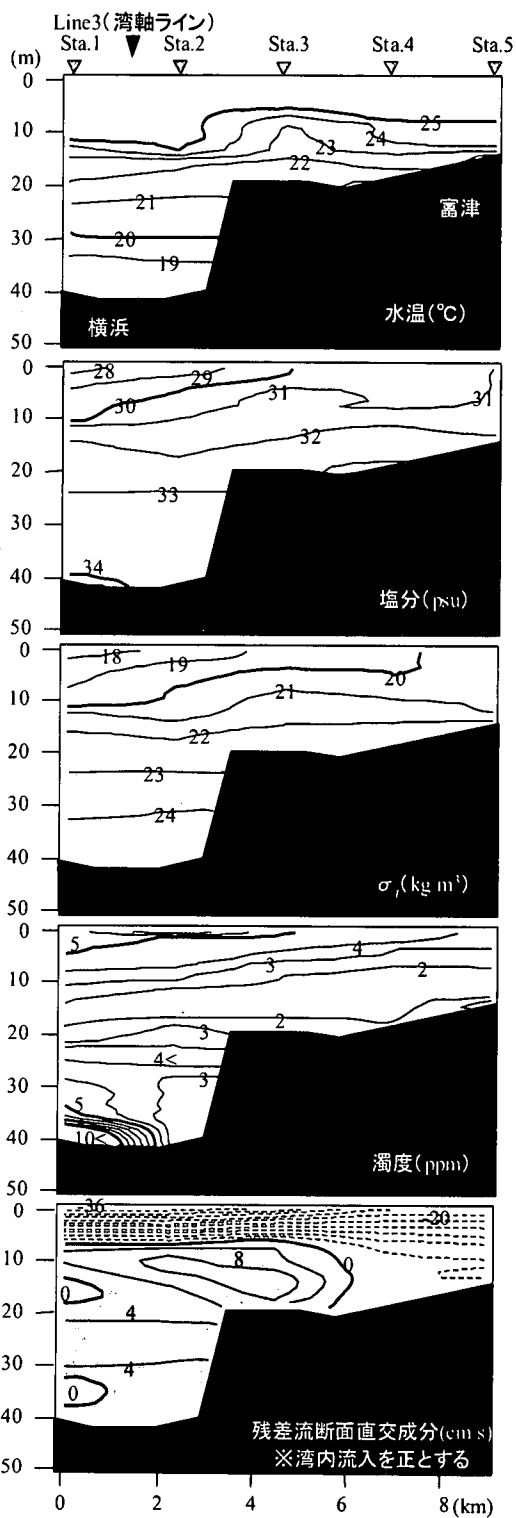


図-14 平常時 (Run2, 8/18, 干潮時) における
水温, 塩分, 密度, 濁度, 残差流 (断面
直交成分) の横断面内分布
(Line2: 富津ライン)

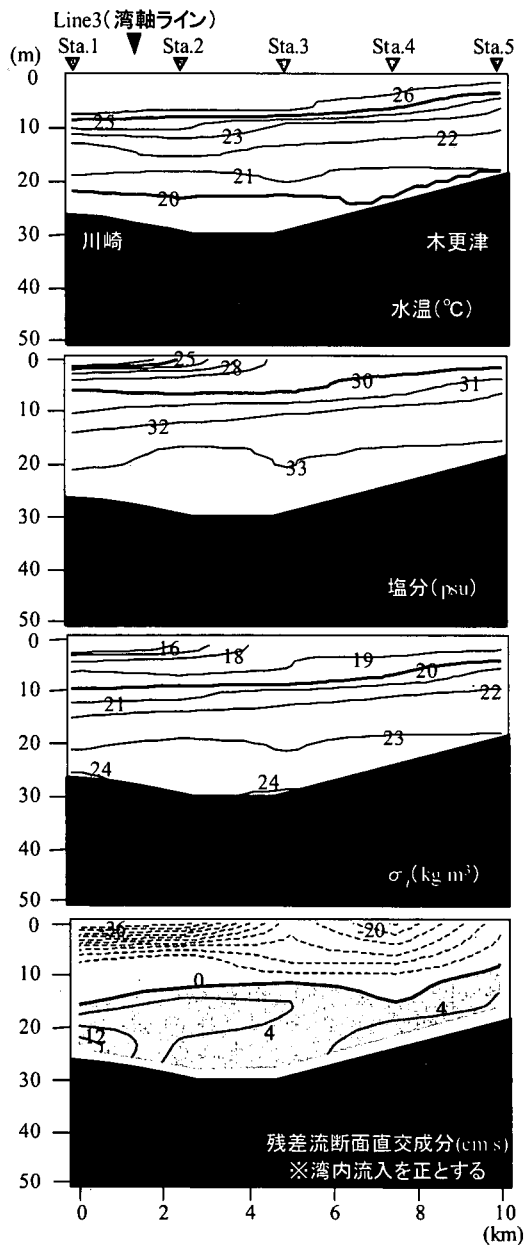


図-15 平常時 (Run2, 8/18, 干潮時) における水温, 塩分, 密度, 残差流 (断面直交成分) の横断面内分布 (Line1: 木更津ライン)

上風は, 数日間程度で南よりと北よりの風が吹き変わっており, この海上風の変動にともなって湾内における残差流 (あるいは25時間移動平均流) のパターンやその大きさも変動しているものと考えられる. 例えば, 南よりの風が卓越していたRun1では, Line1, Line2における残差流パターンは基本的には表層流入・底層流出となっていたのに対し (日向ら¹⁵⁾, 北よりの風が卓越していたRun2では, 反対に

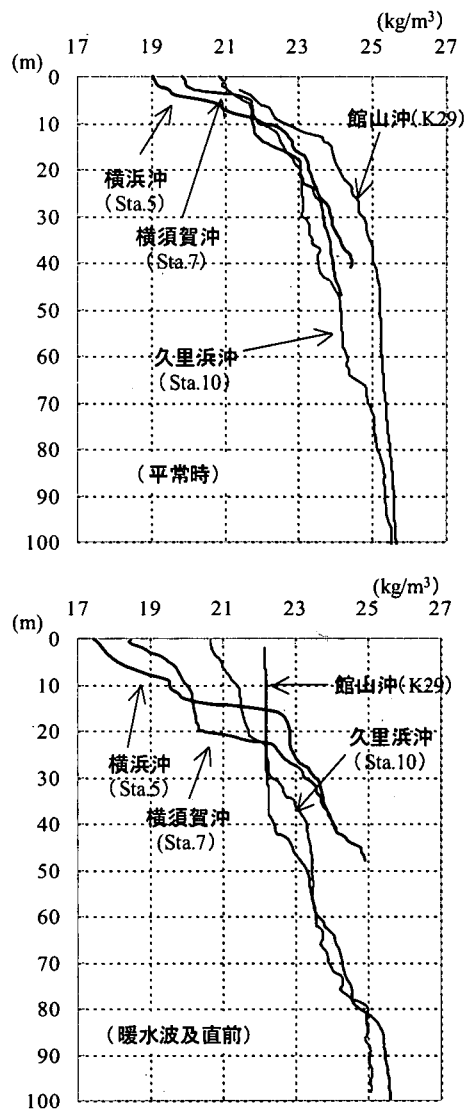


図-16 8月上旬 (8月5, 12日) と2回目の暖水波及直前 (9月7, 10日) における湾内~浦賀水道における密度の鉛直分布

表層流出・底層流入の残差流パターンとなっている (図-14). したがって, 1ヶ月間程度の長期の平均操作によって残差流を求めた場合, それぞれの風向時における流れが互いに相殺されてしまうため, 残差流の大きさはそれぞれの風向時に比べてかなり小さくなってしまふものと考えられる. 実際, 宇野木ら¹⁸⁾の観測結果においても, 北よりの風が卓越していた期間における残差流 (25時間移動平均流) を見ると, 川崎や横浜沖の表層部 (海面下3m地点) において外洋へ向かう20cm/s程度の強い流れが発生しており, 反対に底層では数cm/s~10cm/s程度の湾奥に向かう流れが確認できる.

(3) 8月と9月における湾内水と外洋水間の密度バランスの比較

ここでは、上記のように暖水波及時における湾内密度流の大きさやパターンが平常時と大きく異なっている原因を明らかにするために、8月上旬と2回目の中層貫入が発生する直前(9月中旬)での湾内-浦賀水道間の相対的な密度バランスを、断面観測および神奈川県定期観測データに基づいて比較する。

図-16に8月上旬~中旬(Sta. 5, 7, 10: 8月12日, Sta. K29: 8月5日)と9月上旬~中旬(Sta. 5, 7, 10: 9月10日, Sta. K29: 9月7日)に観測された湾内および浦賀水道(Sta. K29の計測位置は図-3を参照)での密度の鉛直分布を示す。8月上旬における密度分布を見ると、湾内、湾外とも概ね指数関数的な分布形状となっていることが分かる。同一水深における密度を比較すると、基本的には湾奥ほど小さく、外洋側で密度が大きくなっている。したがって、密度流としては、上下2層の典型的なエスチャリー循環が発達するものと考えられる。一方、第2回目の中層貫入が発生する直前の9月9、10日には、浦賀水道の表層40mに密度一定($\sigma_t = 22\text{kg/m}^3$)の水塊が存在していることが分かる。ここでは示さないが、この水塊の水温は25~26°Cであり、塩分は33.5~34psuである。水塊特性から判断して、この浦賀水道表層に存在する暖水が、この直後に湾内中層に貫入する暖水塊であることは明らかである(図-8~11参照)。一方、湾内では、1回目の暖水波及の影響で水温が上下にほぼ一様化しているのに対し、8月下旬からの大量の淡水流入によって湾内表層の塩分が大きく低下し、15~20m深に顕著な塩分躍層が発達していることが確認されている(日向ら¹⁵⁾)。図-16での密度分布は、この塩分分布を反映した形となっており、8月上旬に比べると表層と底層の密度差が大きくなっていることが分かる。水平的に見ると、密度躍層より上層部分では暖水の方が内湾水よりも重く、反対に下層においては内湾水の方が重くなっている。さらに、大量の河川出水の影響によって湾内表層水の密度が小さくなった結果、水平的な密度差は8月上旬に比べて大きくなっていることが分かる。このような内湾-外洋間の密度バランスでは、沖合い表層の暖水が、等密度の水塊が存在する湾内中層(密度躍層付近)に貫入し、表層と底層から湾内水が流出する形の密度流が顕著に発達するものと考えられる。実際、図-8を見ると暖水の貫入は暖水の密度に相当する等密度線($\sigma_t = 22\text{kg/m}^3$)に沿って発達しており、弱い海上風(2m/s程度の北よりの風)であるにも関わらず、その

流入速度は平常時に比べて著しく大きくなっていることが確認できる。このように、海上風の影響が小さかったと考えられる第2回目の暖水波及時において湾軸部分で発生した上下3層の残差流構造は、平常時とは大きく異なる内湾-外洋間の相対的な密度バランスによって駆動された密度流としての性格が強く、大量の淡水供給による湾内表層の低密度化がこの密度流を強化しているものと考えられる。

5. 暖水波及時と平常時における熱、塩分、濁質フラックスと海水交換

このように、暖水波及時には平常時と大きく異なる形の残差流構造が発達しているため、内湾-外洋間の熱、物質フラックスやそれらの輸送機構も平常時とは大きく異なっているものと考えられる。そこで、ここでは、主にRun4(暖水波及時)における熱・物質フラックスと海水交換特性を、観測時における海上風や潮汐の条件がRun4とほぼ同じであるRun2(平常時)の結果と比較検討することによって、暖水波及時における熱・物質フラックスや海水交換能力の特徴を明らかにする。なお、フラックスの算定に用いたデータは断面観測により得られた流速、水温、塩分および濁度のデータである。また、Run1およびRun3における各フラックスについては日向ら¹⁵⁾を参照されたい。フラックスに関する解析に当たっては、その輸送機構を明らかにするために流速 V 、水温や物質濃度 C を時間平均(残差流)成分 \bar{V} 、 \bar{C} と時間変動成分 V' 、 C' に分ける。

$$V = \bar{V} + V', \quad C = \bar{C} + C' \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\quad}$ は時間平均を表す。さらに、それぞれの成分を断面平均成分とそれからの偏差(シア)成分に分解する。

$$\bar{V} = \langle \bar{V} \rangle + \bar{V}_d, \quad V' = \langle V' \rangle + V'_d \quad (2)$$

$$\bar{C} = \langle \bar{C} \rangle + \bar{C}_d, \quad C' = \langle C' \rangle + C'_d \quad (3)$$

ここで、 $\langle \quad \rangle$ は観測断面内の空間平均を、添え字の d は空間平均からの偏差成分を表す。したがって、観測時における単位時間当たりの熱および物質フラックスは、最終的には以下ようになる。

$$\bar{F} = n\Delta A \langle \bar{V} \rangle \langle \bar{C} \rangle + \Delta A \sum_n \bar{V}_d \bar{C}_d$$

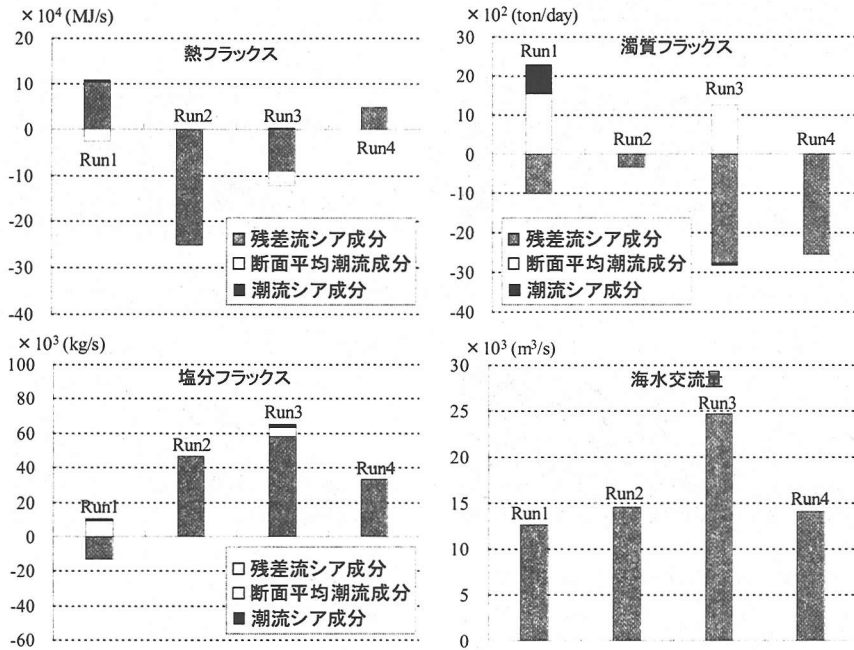


図-17 富津ライン (Line2) における熱、塩分、濁質フラックスと海水交換量

$$+n\Delta A \overline{V^* C'} + \Delta A \sum_n \overline{V'_d C'_d} \quad (4)$$

ここで、 ΔA は幅2.3km、縦1.0mのブロックの面積を、 n は断面内のブロック数(141個)を、 \sum_n は141個のブロックに対する総和を表している。式(4)第1項は断面平均残差流によるフラックスを表しており、一般的には移流項と呼ばれている。なお、先の3.(2)での熱収支解析における「移流による熱輸送量」には、分散成分も含まれていることに注意を要する。また、第2項以下が分散項であり、ここでは、さらに分散項を残差流シア項(第2項)、断面平均潮流項(第3項)、潮流シア項(第4項)に分けている。ただし、ADCPによる観測結果から第1項の移流成分を直接評価することには精度上問題があるため(日向ら¹⁰⁾ここでは示さない。また、Run2やRun4の観測時には、日潮不等が認められたことから、一般に、沿岸域(強潮域を除く)における物質輸送に対して最も大きな働きをしている残差流シアによるフラックスのみを計算している。ただし、Run2とRun4は小潮期に当てており、もともと潮流によるフラックスは残差流シア成分に比べてかなり小さいものと考えられる。また、海水交換量は、ここでは残差流シアを用いて求めた外洋から湾内へ流入する、(あるいは湾内から外洋へ流出する)単位時間当たりの海水量としている。熱、塩分、濁質フラックスの分散成分と海水交換量の

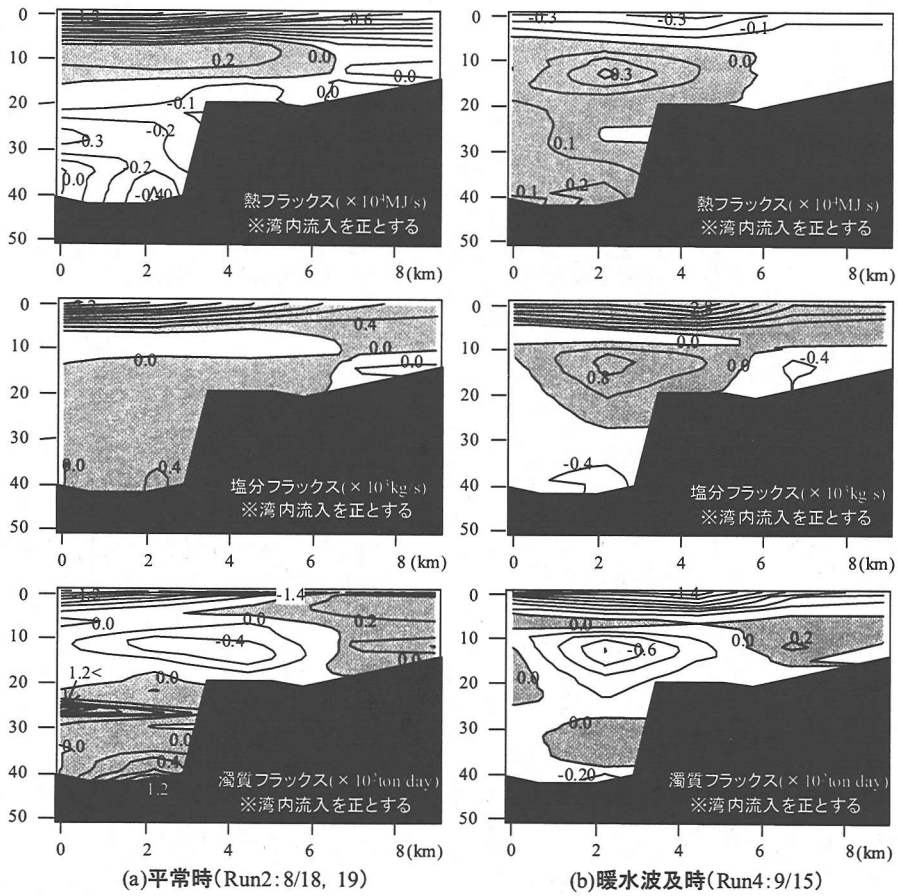
計算結果を図-17に、また、Run2とRun4における各フラックス残差流シア成分の断面内分布を図-18に示す。なお、図-18中の値は、単位ブロック(幅2.3km×高さ1m)当たりのフラックスを示している。

(1) 熱フラックス

Run4(暖水波及時)では、神奈川県側表層および千葉県側全層から湾内の熱が外洋へ流出している。しかしながら、主に高温沿岸水が神奈川県側中層に貫入し、神奈川県側底層から低温水が外洋へ流出することによって、トータルとしては外洋から湾内へ熱が輸送されている。このように、熱収支解析によって明らかとなった暖水波及時における外洋から湾内への活発な熱輸送には、神奈川県側に形成される3層の残差流構造が重要な役割を果たしている。一方、Run2(平常時)では、高温の湾内表層水が外洋へ流出し、底層の低温水が湾内へ流入しているために、トータルとしては湾内の熱が外洋へ流出している。

(2) 塩分フラックス

Run4では、主に高塩分の高温沿岸水が湾内中層に貫入し、低塩分の湾内表層水が外洋へ流出しているために、トータルとしては外洋から湾内へ塩分が輸送されている。また、神奈川県側底層からは湾内の塩分が外洋へ流出している。一方、Run2では、ほぼ全



図一八 富津ライン (Line2) における熱、塩分、濁質フラックスの残差流シア成分の断面内分布

断面において外洋から湾内に塩分が輸送されている。これは、低塩分の湾内表層水が外洋へ流出し、高塩分水が湾内底層へ流入しているためである。このように、熱フラックスと同様、Run2とRun4では、特に神奈川県側底層付近における塩分輸送の形態が大きく異なっていることが分かる。

(3) 濁質フラックス

Run4では、外洋からほとんど濁りのない高温沿岸水が湾内中層に貫入し、表層と底層から湾内の高濁度水が外洋へ流出しているため、湾内の濁質が大量に外洋へ輸送されている。これに対し、Run2では、表層から湾内の高濁度水が外洋へ流出し、底層から高濁度水が湾内へ流入している。その結果、Run2では、湾内の濁質がほとんど外洋へ排出されていない。一般に東京湾では、表層と底層に濁質が多く存在しているため、暖水波及時に形成される上下3層の残差流構造が、湾内表層と底層の濁質を効果的に外洋へ

輸送していることが分かる。

(4) 海水交換量

海水交換量は、Run1, Run2, Run4がほぼ同量で、Run3がそれらの約2倍になっていることが分かる。観音崎と富津岬を結んだラインよりも北側の海域の体積はおおよそ17km³であるから、単純にこの体積を各Runごとの海水交換量で除して海水の滞留時間(あるいは置換時間)を求めてみると、Run1, Run2, Run4では15日程度、Run3では8日程度となる。これは、宇野木・岸野¹⁹⁾がボックスモデルを利用し、28年間の観測データに基づいて算出した海水の滞留時間(8月:約30日, 9月:約24日)の1/3~1/2程度の値となっている。そこで、次に、本観測によって得られた海水交換量が、宇野木・岸野¹⁹⁾による見積もりに比べ大きくなった原因について考察してみる。

まず、夏季(8月)に行ったRun1とRun2につい

て検討する。先に4.(2)で述べたように、東京湾では夏季(7~8月)は海上風の風向変動が激しく、南よりの風と北よりの風が数日間程度で交互に吹き変わっており、この風向変動にともなう湾内における残差流構造は変化している。その結果、それぞれの風向時における外洋-内湾間の塩分フラックスやその輸送パターンも大きく異なっている。南風卓越時には低塩分水が湾内表層に流入し、高塩分の内湾底層水が湾外へ流出する形の残差流が卓越するために、トータルとしては湾内から外洋へ塩分が輸送されているのに対し、北風卓越時には低塩分の内湾表層水が流出し、高塩分水が内湾底層に流入する形の残差流構造が発達するために、トータルとして湾内へ塩分が輸送されているものと考えられる(図-17)。このように夏季においては、湾口部を介した正味の塩分輸送の方向が数日スケールで変動しているため、長期間の観測結果、すなわち北風、南風が卓越する両方の時期を含む塩分の観測結果に基づいて算出した海水交流量は、本観測のように1潮汐間の観測結果から求めた海水交流量に比べて小さくなる可能性が高い。このことは、夏季1ヶ月間の平均(残差)流の大きさが、それぞれの風向時における残差流に比べて小さくなっていることに対応しているものと考えられる。反対に海上風が安定している季節、すなわち残差流パターンの変動が小さい季節においては、両者の方法による海水交流量の評価は比較的近い値になるものと考えられる。

一方、夏季に比べ北よりの風が安定的に連吹する9月に行ったRun3やRun4における海水交流量が、ボックスモデルによる見積もりに比べて大きくなった主な原因としては、湾内への淡水流入量の増加と海上風による影響が考えられる。多摩川(石原)における河川流量を調べてみると、8月28日~9月15日における単位時間当たりの平均流量は約167m³/sであり、1980年から1997年までに9月における平均流量(約63m³/s、文献20))の約2.7倍にまで達している。また、Run3の観測時には、この大量の淡水流入に加え、強い北よりの風が連吹していたことによって非常に活発な海水交換が行われていたものと考えられる。

以上、本観測により得られた海水交流量は、使用したデータ、計算方法あるいは観測時の状態(河川流入量、海上風)の違いにより既存の解析結果に比べ2、3倍程度大きな値となった。また、第2回目の暖水波及時における海水交流量は、平常時(Run2)とほぼ同程度であるが、残差流構造や海洋構造が平常時(Run2)とは大きく異なっているために、熱・物質フラックスやその輸送パターンが平常時(Run2)と

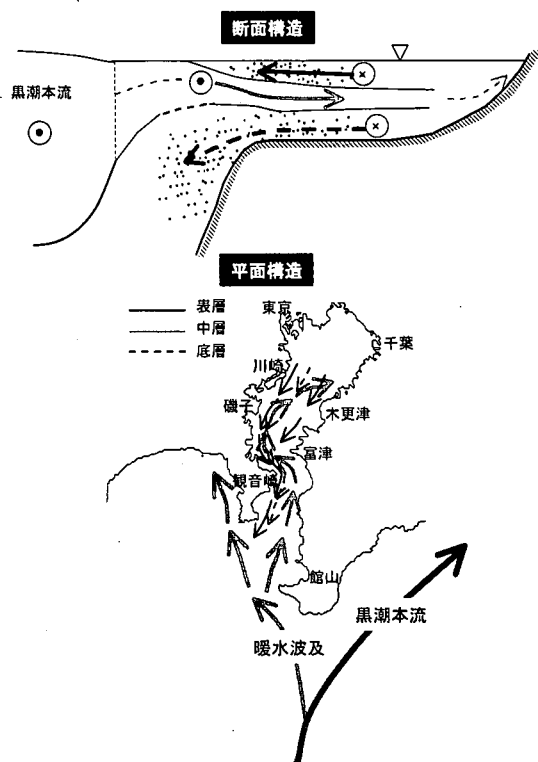


図-19 暖水波及時の東京湾海域における流動構造の模式図

は大きく異なっていることが明らかとなった。特に、暖水波及時に神奈川県側の湾軸部分で形成される上下3層の流動構造の働きによって、平常時(Run2)と比較すると神奈川県側底層付近において熱、塩分、濁質フラックスに顕著な相違が見られた。

6. 結論

本観測によって明らかとなった成層期の暖水波及時における湾内流動の模式図を図-19に示す。本研究では、Yanagi et al.¹¹⁾によってその存在の可能性が示唆されてきた成層期における沖合暖水の中層貫入現象を、現地観測によって直接とらえ、中層貫入発生時における湾内の3次元な流動および海洋構造、さらに、物質輸送特性や海水交換特性を初めて明らかにした。以下に、本研究によって得られた主要な結論を述べる。

(1) 夏季から初秋季にかけて、東京湾内では成層が顕著に発達しているため、湾内表層水は沖合い暖水よりも軽く、湾内底層水は沖合い暖水よりも重くなっている。そのため、成層期に沿岸域へ波及した沖合い暖水は、基本的には密度流として湾内中層に

侵入する。その結果、湾口部から湾中央部にかけての湾軸部分では、明確な上下3層の残差流構造が形成される。

(2) 暖水波及時における東京湾内の流動・海洋構造は3次元的であり、沖合い暖水は、湾内地形や地球自転の効果によって、その侵入経路を複雑に変化させながら湾奥へ向かって侵入する。これに対し、平常時における残差流構造は、基本的には湾奥からの淡水供給に起因した上下2層の流れ(エスチャリー循環)が卓越している。

(3) 海上風が弱い時期における暖水波及時の海水流量は、平常時とほぼ同程度である。しかしながら、平常時とは異なる残差流・海洋構造の働きにより、湾口部における熱・物質フラックスやその輸送特性は平常時とは大きく異なっている。特に、暖水波及時に湾軸部で発達する上下3層の残差流構造は、湾内表層と底層の濁質を効果的に外洋へ輸送する働きがある。

最近、著者らは、総観スケールの黒潮変動が東京湾における海況変動に果たす役割を明らかにすべく、東京湾における現地観測を積極的に行ってきた。その結果、日向ら¹⁰⁾や本研究によって、黒潮の総観スケールの変動が、冬季や夏季における東京湾の海況や内湾-外洋間の物質輸送に非常に大きな影響を与えていることが明らかとなった。これらの事実は、将来、東京湾において何らかの環境アセスメントを行う場合や湾内の水産資源を管理していく上で、潮汐や河川水、あるいは海上風の影響だけではなく、外洋、特に黒潮の総観スケールの海況変動を考慮する必要があることを明確な形で示すものである。しかしながら、現時点においては、このような要請に精度良く答えるだけの予測技術は確立されていない。今後は、外洋における総観スケールの海況変動を再現することが可能な外洋モデルと沿岸流動モデルとのカップリングが必要となる。その際、その数値モデルの精度を向上させるためには、沿岸-外洋域におけるリアルタイムモニタリングシステムの構築が重要となることは言うまでもない。

謝辞: 現地観測を行うにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所古川恵太氏、千葉県水質保全研究所小倉久子氏、第3管区海上保安本部、東京湾海上交通センターの皆様には大変お世話になった。第2海保における風データを旧運輸省第2港湾建設局から、東京湾・相模湾における流速および水質データを神奈川県水産総合研究所から、多摩川の河川流量データを旧建設省京浜工事事務所から、また、フェリーによる航走水温データを東京都水産試験場八丈

分場から提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。なお、本研究の一部は運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」、および文部省科研費基盤研究(B)(1)(課題番号:10450181, 代表者:灘岡和夫)の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参考文献

- 1) 杉本隆成: 総論 黒潮沿岸域の流動と海水交換, 月刊海洋, Vol.26, No.11, pp.673-678, 1994.
- 2) 黒潮沿岸域の流動と海水交換, 月刊海洋, Vol.26, No.11, 1994.
- 3) 松山優治, 岩田静夫, 前田明夫, 鈴木亨: 相模湾の急潮, 沿岸海洋研究ノート, 第30巻, pp.4-15, 1992.
- 4) 武岡英隆, 秋山秀樹, 菊池隆展: 豊後水道の急潮, 沿岸海洋研究ノート, 第30巻, pp.16-26, 1992.
- 5) Takeoka, H. and T. Yoshimura: The *Kyuchō* in Uwajima Bay, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol.44, pp.6-16, 1988.
- 6) 秋山秀樹, 柳哲雄: 宿毛湾の水温急変現象の機構, 沿岸海洋研究ノート, 第22巻, pp.61-66, 1984.
- 7) 秋山秀樹: 宿毛湾の急潮, 沿岸海洋研究ノート, 第29巻, pp.61-66, 1991.
- 8) Yoshioka, H.: The coastal front in the Kii Channel in winter, 海と空, 第64巻, 第2号, pp.79-111, 1988.
- 9) 秋山秀樹: 九州南-東岸海域に出現する黒潮暖水舌の動態, 月刊海洋, Vol.26, No.11, pp.689-697, 1994.
- 10) 日向博文, 八木宏, 吉岡健, 灘岡和夫: 黒潮系暖水波及時における冬季東京湾湾口部の流動構造と熱・物質フラックス, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.221-238, 2000.
- 11) Yanagi, T., Tamaru, H., Ishimaru, T. and Saino, T.: Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in Summer, *La mer*, Vol.27, pp.34-40, 1989.
- 12) 野村英明: 内湾と外洋の相互作用 生物学からの視点「動物プランクトンを例として」, 沿岸海洋研究ノート, 第34巻, pp.25-35, 1996.
- 13) 高橋鉄哉, 藤原建紀, 山田佳昭, 兼子昭夫: 東京湾における外洋水の進入と貧酸素水塊, 1999年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, p.79, 1999.
- 14) 八木宏, 灘岡和夫, 内山雄介, 日向博文: 長期連続観測に基づく東京湾・鹿島灘・霞ヶ浦の年間水温変動特性の比較, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.239-254, 2000.
- 15) 日向博文, 灘岡和夫, 田淵広嗣, 吉岡健, 古川恵太, 八木宏: 東京湾における成層期流況の動的変動過程, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.451-455, 1999.
- 16) 杉山陽一, 藤原建紀, 中辻啓二, 福井真吾: ADCPによる伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1096-1100, 1995.
- 17) 日向博文, 八木宏, 灘岡和夫, 齊藤輝彦, 田淵広嗣: 夏季東京湾における内部潮汐波の基本特性について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.426-430, 2000.
- 18) 宇野木早苗, 岡崎守良, 長島秀樹: 東京湾の循環流と海況, 理化学研究所海洋物理研究室 Technical Report, No.4, 1980.

- 19)宇野木早苗, 岸野元彰: 大局的に見た内湾の海水交流,
海岸工学論文集, 第24巻, pp.486-490, 1977.
20)流量年表: 日本河川協会, 1980-1997.

(2000. 4. 12 受付)

CURRENTS AND MATERIAL TRANSPORT IN TOKYO BAY
DUE TO COASTAL WARM WATER INTRUSION
INDUCED BY THE KUROSHIO FLUCTUATION IN STRATIFIED CONDITIONS

Hirofumi HINATA, Kazuo NADAOKA, Hiroshi YAGI, Hirotsugu TABUCHI
and Takeshi YOSHIOKA

Field measurements were performed to investigate the effects of the Kuroshio current fluctuation on the 3-D characteristics of currents and material transport in Tokyo Bay in stratified conditions. When coastal warm water intrusion induced by the fluctuation of the Kuroshio current occurs, the bay water both in the surface and bottom layers with high temperature, low salinity and high turbidity and with low temperature and high turbidity, respectively, flows toward the ocean; the coastal warm water with high temperature, high salinity and low turbidity intrudes into the bay with a complicated 3-D feature. This current system with the three-layer structure, in contrast to the two-layer current system of the estuary circulation, may effectively transport the turbid water in the bay toward the ocean.